Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 4, Sep.-Oct. 2022 p. 439-458

Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River)

M. Mohammadi Ghaleni[1*], H. Kardan Moghaddam[2]

Received: 11-07-2022 Revised: 30-07-2022 Accepted: 08-08-2022 Available Online: 21-11-2022	**How to cite this article:** Mohammadi Ghaleni, M., & Kardan Moghaddam, H. (2022). Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River). *Journal of Water and Soil 36*(4): 439-458. (In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/JSW.2022.77413.1177

Introduction

The water quantity and quality has always been one of the main challenges in the issue of allocating water resources for different uses. Water quality management requires the collection and analysis of large amounts of water quality parameters that will be evaluated and concluded. Many tools have been found to simplify the evaluation of water quality data, and the water quality index (WQI) is one of these widely used tools. In summary, the WQI can be defined as a number obtained from the combination of several quality parameters based on standards for its extraction. The aim of this study was to develop and introduce the new Surface Drinking Water Quality Index (SDWQI) adopt the water quality parameters measured on hydrometric stations of Iran. In developing this index, criteria such as the availability of required parameters in most rivers and simple and accurate methods have been considered. Also, the ability to calculate with the minimum general parameters of water quality, simple calculations and in terms of the international standard WHO for drinking is one of the advantages of the introduced index.

Materials and Methods

For this purpose, 12 water quality parameters including Total Dissolved Solids (TDS), Electrical Conductivity (EC), Total Hardness (TH), pH, Chloride (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}), Carbonate (CO_3^{2-}), Bicarbonate (HCO_3^-), Magnesium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}) and Potassium (K^+) have been used from Rudbar and Astaneh hydrometric stations located on Sefidroud river. Then initial preprocessing on data e.g. correlation analysis, and multivariate statistical methods including cluster analysis (CA) and principal components analysis (PCA) are used to selecting and weighting of water quality parameters using the “clustering” and “factoextra” packages in R 4.1.1. In order to develop the SDWQI were performed four steps including, parameter selection, sub-indexing, weighting and aggregation of the index. Also, in order to evaluate the index of the present research, the results of the SDWQI have been compared with the WHO drinking water quality index and Schoeller drinking water quality classification.

Results and Discussion

Correlation analysis between water quality parameters shows a significant correlation between TDS, EC and TH parameters and also with Cl^-, Ca_2^+ and Mg_2^+ parameters at the level of 1% in both Astaneh and Rudbar stations. On the other hand, the lowest values of Pearson correlation coefficient are related to pH and CO_3^{2-} parameters with other quality parameters. The results of CA indicate that most of the water quality parameters are located in separate clusters. So only the parameters TDS, EC, Cl^- and Na^+ in both Rudbar and Astaneh stations are in the same cluster. The weights of the parameters showed that TDS and K^+ are assigned with the

1- Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran
(*- Corresponding Author Email: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)
2- Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran

highest and lowest weights equal to 0.163 and 0.031 based on PCA method. Also, PCA results show that first and second principal components covered 59.3% and 67.6% of the total variance of measured water quality parameters in Rudbar and Astaneh stations, respectively. Water quality classification results indicate that (40.5%, 16.4% and 23.7%) and (90.1%, 73.1% and 57.3%) of data in Rudbar and Astaneh stations, respectively, fell into the excellent and good categories for drinking purposes based on Schoeller classification, WHOWQI and SDWQI.

Conclusion

Generally, the comparison of the SDWQI with the WHO index and the Schoeller classification shows the rigidity of the new index in the classification of water quality for drinking purposes. Each water quality index developed in order to evaluate the uncertainty of results, should be tested for data with different characteristics in terms of the range of variation with different limit values (minimum and maximum). The index developed in the present study is no exception to this rule and in order to evaluate the results better, it is suggested that to be evaluated and analyzed with data from other hydrometric stations. Another important point that should be considered in using any water quality index, including the present research index, is to examine the allowable limits of water quality parameters that are not considered in these indicators. The results of the study indicated that two most important steps in the development of a quality index that have a great impact on its results are sub-indexing and weighting of parameters. According to the results, two ideas recommended for future research. One, choosing an appropriate method such as non-deterministic (fuzzy) and intelligent (machine learning) methods to sub-index the parameters and two, to weigh the parameters more effectively, multivariate statistical methods such as clustering, factor analysis and principal component analysis should be used.

Keywords: Clustering, Hydrometric stations, Principal component analysis, Sefidroud river, Water quality index

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۵۸-۴۳۹

معرفی شاخص جدید کیفیت منابع آب سطحی جهت مصارف شرب با استفاده از روش‌های چندمتغیره آماری (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)

مهدی محمدی قلعه‌نی[1*]- حمید کاردان مقدم[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

چکیده

هدف از تحقیق حاضر توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب شرب (SDWQI)، با استفاده از پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه سفیدرود است. به این منظور ۱۲ پارامتر کیفی ماهانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{-2})، کربنات (CO_3^{-2})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) طی دوره آماری ۱۳۶۶-۹۹ در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه واقع در رودخانه سفیدرود استفاده شده است. پس از پردازش‌های اولیه روی داده‌ها مانند تحلیل همبستگی پارامترها، از روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور انتخاب و وزن‌دهی پارامترهای کیفیت آب با استفاده از بسته‌های "cluster" و "factoextra" در نرم‌افزار R 4.1.1 برای توسعه شاخص جدید کیفیت آب استفاده شده است. نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO) و دسته‌بندی کیفیت آب شرب شولر مقایسه شده است. وزن‌دهی پارامترها با استفاده از روش PCA حاکی از اختصاص بیشترین و کمترین وزن به ترتیب به پارامترهای TDS و K^+ و برابر ۰/۱۶۳ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از پوشش ۵۹/۳ و ۶۷/۶ درصدی مولفه‌های اصلی اول و دوم از واریانس تغییرات کل پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی به ترتیب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد. نتایج دسته‌بندی کیفیت آب بیانگر قرار گرفتن به ترتیب (۴۰/۵، ۱۶/۴ و ۲۳/۷ درصد) و (۹۰/۱، ۷۳/۱ و ۵۷/۳ درصد) داده‌های ایستگاه‌های رودبار و آستانه در رده‌ی خوب و عالی جهت مصارف شرب بر اساس دسته‌بندی شولر، شاخص WHO و شاخص جدید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هیدرومتری، پارامترهای کیفیت آب، خوشه‌بندی، رودخانه سفیدرود، شاخص کیفیت آب

مقدمه

موضوع کمیت و کیفیت آب، همواره از چالش‌های اساسی در مسئله تخصیص منابع آب به مصارف مختلف می‌باشد. عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی معمولا باعث تخریب کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شوند. شرایط آب و هوایی، ریزش‌های جوی، خشکسالی، سیلاب، فرسایش خاک، زمین‌شناسی منطقه و انحلال مواد معدنی از جمله عوامل طبیعی کاهش کیفیت منابع آب می‌باشند. از طرف دیگر فعالیت‌های انسانی مانند رشد جمعیت، تخلیه آلاینده‌های شهری و صنعتی، دفن پسماندها و فعالیت‌های کشاورزی از جمله مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت آب در رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌باشند. کاهش کیفیت منابع آب با توجه به حدود مجاز استانداردهای لازم بر اساس نوع مصارف شرب، کشاورزی، خدمات و یا صنعت، استفاده از این‌گونه منابع آبی را محدود می‌سازد (Kumar and Sangeetha, 2020).

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)
۲- استادیار موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.77413.1177

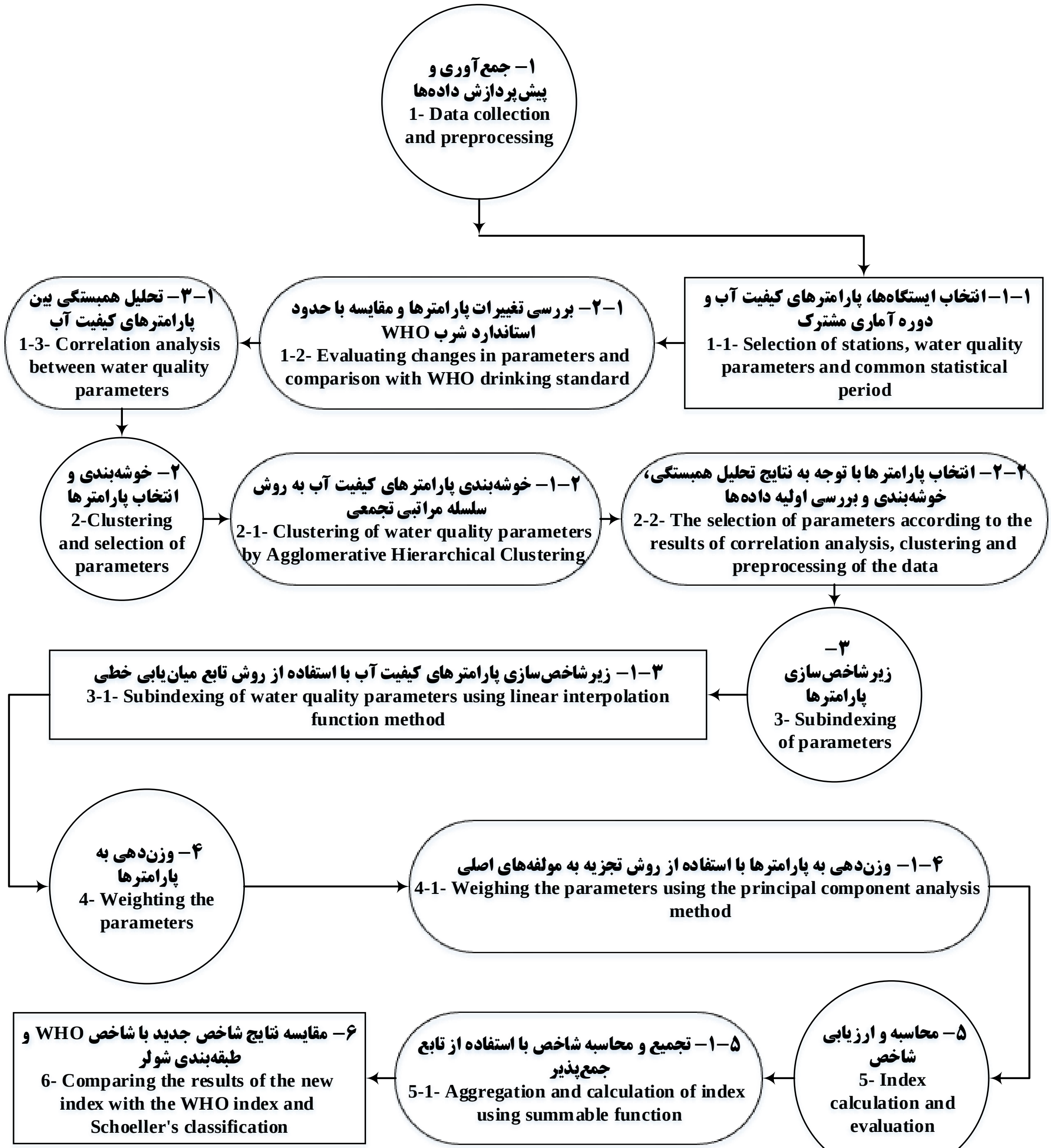
مدیریت کیفیت آب نیازمند جمع‌آوری و تحلیل حجم زیادی از داده‌های پارامترهای کیفیت آب است که ارزیابی و نتیجه‌گیری از آنها مشکل خواهد بود. ابزارهای زیادی برای ارزیابی ساده‌تر داده‌های کیفیت آب توسعه یافته است که شاخص کیفیت آب[1] یکی از این ابزارهای پرکاربرد می‌باشد. جذابیت استفاده از یک عدد به عنوان شاخص کیفیت آب به جای مجموعه داده‌های پیچیده پارامترهای کیفیت آب برای مدیران و سایر مردم به خاطر درک راحت‌تر آن وجود دارد(Uddin *et al.*, 2021). اگرچه تعاریف متفاوتی از شاخص کیفیت آب وجود دارد اما به طور خلاصه شاخص کیفیت آب را می‌توان یک عدد حاصل از ترکیب چند متغیر با لحاظ استانداردهایی برای استخراج آن برشمرد (Darapu *et al.*, 2011). از زمان پیدایش مفهوم شاخص کیفیت آب، مطالعات بسیار زیادی به منظور افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت مقادیر شاخص انجام شده است. هر شاخص توسعه داده شده دارای مزایا و معایب بوده و در یک شرایط محدود و به منظور اهداف خاصی قابل کاربرد می‌باشد. عدم قطعیت زیاد، کاربرد خاص و محدود و بیش‌برآورد یا کم‌برآورد کردن از جمله مهم‌ترین معایب اکثر شاخص‌های کیفیت آب توسعه داده شده است(Dao *et al.*, 2020).

اگرچه توسعه شاخص‌های کیفیت آب محدود به ۵۰ سال اخیر می‌باشد، اما استفاده از این شاخص‌ها به منظور طبقه‌بندی کیفیت آب به اواسط قرن هجدهم میلادی باز می‌گردد (Abbasi and Abassi, 2012). نخستین شاخص کیفیت آب توسط هورتون در دهه ۱۹۶۰ میلادی با استفاده از ۱۰ پارامتر کیفی قابل لحاظ برای اکثر پیکره‌های آبی توسعه داده شد (Horton, 1965). براون و همکاران (Brown *et al.*, 1970) با حمایت بنیاد ملی بهداشت[2] (NSF) شاخص ارائه شده توسط هورتون را اصلاح و با عنوان شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSF-WQI) ارائه کردند. شاخص‌های کیفیت آب دیگری نیز بر اساس شاخص NSF-WQI توسعه داده شده است(Uddin *et al.*, 2021). تا به حال بیش از ۳۵ شاخص کیفیت آب توسط کشورها یا سازمان‌های مختلف به منظور ارزیابی کیفیت آبهای سطحی در سراسر جهان معرفی شده است (Abbasi and Abbasi, 2012; Dadolahi-Sohrab *et al.*, 2012; Kannel *et al.*, 2007; Stoner, 1978). یکی از مهم‌ترین معایب اکثر شاخص‌های کیفیت آب، عدم امکان استفاده از آنها به خاطر عدم اندازه‌گیری و در دسترس بودن پارامترهای کیفی مورد استفاده در آنها می‌باشد.

۱- پارامترهای کیفیت آب موردنیاز برای محاسبه شاخص: توسعه شاخص جدید با استفاده از پارامترهای معمول اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری روی رودخانه سفیدرود انجام شده است. این مهم‌ترین مزیت شاخص معرفی شده است که کاربرد آن را در همه رودخانه‌هایی که دارای ایستگاه هیدرومتری می‌باشند، امکان‌پذیر می‌سازد. به منظور توسعه شاخص جدید، ۱۱ پارامتر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{-2})، کربنات (CO_3^{-2})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) در مقیاس ماهانه طی یک دوره آماری ۳۴ ساله (۹۹-۱۳۶۶) استفاده شده است.
۲- توسعه شاخص به منظور کاربرد مصارف شرب: با توجه به محدودیت‌های منابع آبی به خصوص جهت مصارف شرب، قابلیت ارزیابی اولیه و آسان کیفیت آب در بازه‌های مختلف رودخانه‌ها به منظور کاربرد جهت مصارف شرب از دیگر مزایای شاخص جدید معرفی شده می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری می‌باشد که ارزیابی کیفیت آب جهت مصارف شرب با لحاظ تمامی استانداردها و حساسیت‌های مصرف شرب، نیاز به پارامترها و بررسی‌های بسیار زیادی دارد. اما هدف از این تحقیق ارزیابی اولیه کیفیت آب رودخانه‌ها با توجه به حداقل پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس استاندارد کیفیت آب سازمان بهداشت جهانی[3] (WHO) است. ۳- روش توسعه شاخص معرفی شده: در این تحقیق سعی شده است مواد و روش‌هایی جامع، ساده و دقیق برای توسعه شاخص کیفیت آب ارائه شود تا روش تحقیق بیان شده قابل فهم و کاربرد برای تمامی محققان فعال در زمینه مباحث کیفیت آب باشد. به منظور توسعه شاخص جدید در هر مرحله تمامی روش‌ها به طور مختصر بیان و روش مورد استفاده به طور کامل شرح داده شده است.

هدف اصلی از تحقیق حاضر توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب‌های سطحی به منظور کاربرد برای مصارف شرب[4] (SDWQI) می‌باشد. در توسعه این شاخص ملاک‌هایی مانند در دسترس بودن پارامترهای موردنیاز در اکثر رودخانه‌ها و روش کار ساده و دقیق مد نظر قرار گرفته است. به طور خلاصه قابلیت محاسبه با حداقل پارامترهای عمومی کیفیت آب، محاسبات ساده و لحاظ استاندارد بین‌المللی WHO برای مصارف شرب از مزایای شاخص معرفی شده می‌باشد.

1- Water Quality Index
2- National Sanitation Foundation (NSF)
3- World Health Organization (WHO)
4- Surface water Drinking Water Quality Index (SDWQI)



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق حاضر

Figure 1- Flowchart of the present research

مواد و روش‌ها

توسعه یک شاخص کیفیت آب دارای چهار مرحله کلی شامل؛ ۱) انتخاب پارامترها[1]، ۲) زیرشاخص‌سازی[2] پارامترها، ۳) وزن‌دهی به

1- Parameter selection
2- Sub-indexing

پارامترها[1] و ۴) فرآیند تجمیع[2] شاخص می‌باشد. روش مورد استفاده در تحقیق حاضر برای هر یک از این مراحل در ادامه شرح داده شده است. در مرحله انتخاب پارامترها یک یا چند پارامتر کیفی برای مدنظر قرار دادن در شاخص کیفیت آب انتخاب می‌شوند. در مرحله دوم با توجه به متفاوت بودن واحدهای پارامترهای انتخاب شده، تمامی واحدها به صورت بدون بعد تبدیل می‌شوند. وزن‌دهی به پارامترهای کیفی با توجه به درصد اهمیت آنها در مرحله سوم توسعه شاخص کیفی انجام می‌شود. تجمیع پارامترها و تبدیل تمامی پارامترها به یک شاخص عددی در مرحله نهایی محاسبه شاخص کیفی انجام می‌شود (Uddin *et al*., 2021). فلوچارت انجام تحقیق حاضر به صورت شکل ۱ می‌باشد.

جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها

با توجه به هدف تحقیق حاضر، پارامترهای کیفیت آب که به طور معمول در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، به منظور توسعه یک شاخص کیفیت آب به منظور مصارف شرب مورد استفاده قرار گرفته است. به این منظور ۱۱ پارامتر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{-2})، کربنات (CO_3^{-2})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) در مقیاس ماهانه طی یک دوره آماری ۳۴ ساله (۱۳۶۶-۹۹) استفاده شده است. طول دوره آماری داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر (۱۳۶۶-۹۹) با در نظر گرفتن مشخصاتی مانند بلندمدت بودن طول دوره آماری (حداقل ۳۰ سال)، دوره زمانی یکسان آمار موجود در دو ایستگاه هیدرومتری و کیفیت داده‌ها از لحاظ داده‌های گمشده‌ی کمتر، انتخاب شده است. محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

از مجموع ۴۴۸۸ داده پارامترهای کیفیت آب (۴۰۸ ماه برای ۱۱ پارامتر) اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه هیدرومتری در ۳۴ سال آمار مورد استفاده به ترتیب ۱۴ (۰/۳۱ درصد) و ۳۰ (۰/۶۷ درصد) داده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه جزء داده‌های ناقص می‌باشد، که این داده‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیونی و همبستگی حداکثر بین متغیرها کامل شده است. داده‌های پرت می‌توانند به دلایلی مانند اشتباه انسانی در اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها، خطاهای وسایل اندازه‌گیری، روش‌های اشتباه در تشخیص داده‌های پرت، پردازش داده‌ها و نمونه‌برداری، داده‌برداری اشتباه در اثر طرح‌ریزی زمانی-مکانی نادرست، و طبیعت داده‌ها (جهش در داده‌ها به صورت طبیعی) رخ دهد. تشخیص داده‌های پرت در تحقیق حاضر با استفاده از آزمون ناپارامتری گرابز انجام شده است (Grubbs, 1950; Casillas *et al*., 2021).

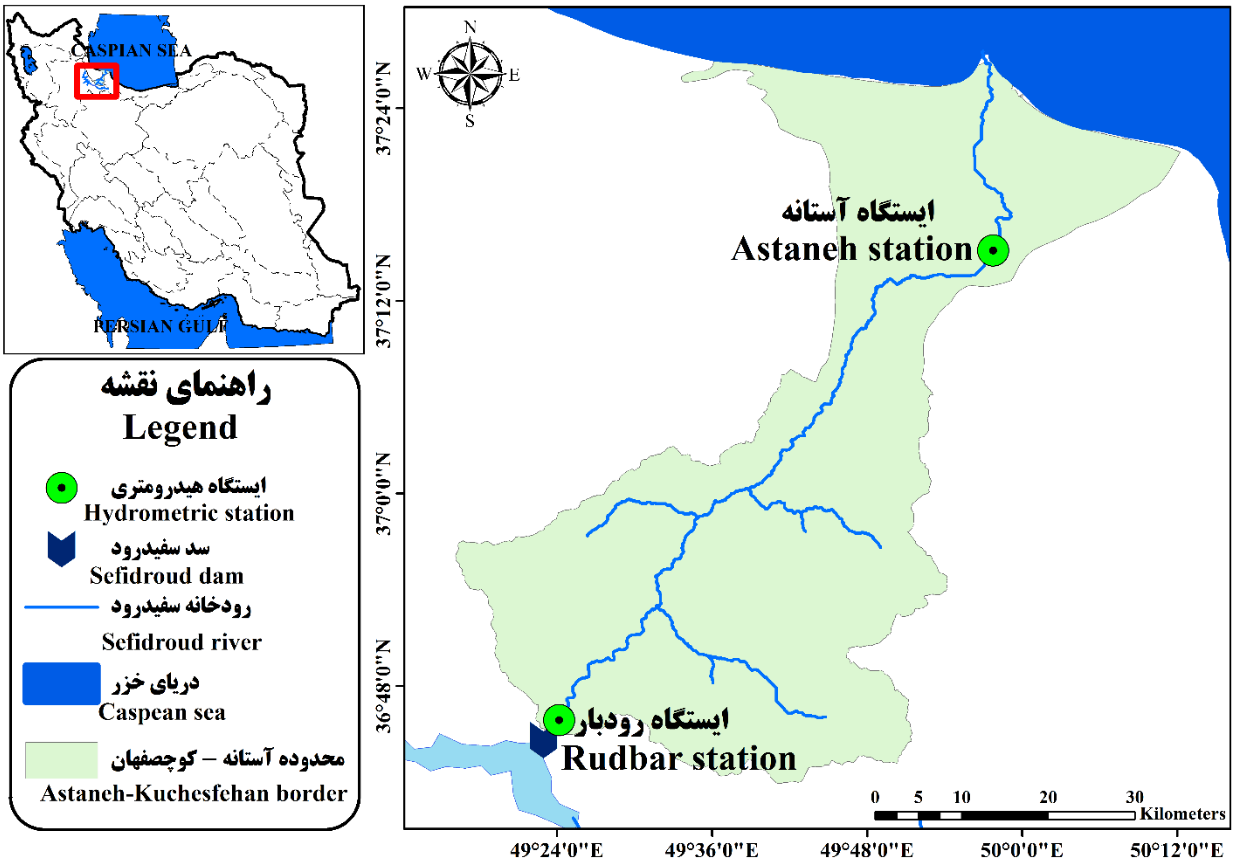
1- Parameter weighting
2- Aggregation process

خوشه‌بندی و انتخاب پارامترها

انتخاب پارامتر اولین مرحله از توسعه یک شاخص کیفیت آب می‌باشد که باید نوع و تعداد متغیرها با دلایل انتخاب‌شان در این مرحله مشخص شود. اغلب شاخص‌ها بین ۸ تا ۱۱ پارامتر و اغلب شامل دمای آب، کدورت[3]، pH، جامدات معلق[4] (SS)، کل مواد جامد محلول[5] (TDS)، فکال کلیفرم[6] (FC)، اکسیژن محلول[7] (DO)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی[8] (BOD) و نیتروژن نیتراتی (NH_3-N) می‌باشد. پارامترهای شاخص کیفیت آب بر اساس داده‌های موجود، نظرات کارشناسان و یا درجه اهمیت زیست‌محیطی انتخاب می‌شوند. در برخی از تحقیقات پارامترها بر اساس نوع استفاده از آب مانند شرب، کشاورزی و یا اثرات زیست‌محیطی انتخاب شده است (Kannel *et al*., 2007). اگرچه به طور کلی هیچ قاعده و قانون مشخصی برای انتخاب پارامترهای یک شاخص کیفیت آب وجود ندارد اما، تاثیرگذارترین عامل محدودیت‌های موجود در داده‌های در دسترس می‌باشد (Uddin *et al*., 2021; Naubi Ma *et al*., 2016).

موجود نبودن پارامترهای استفاده شده در یک شاخص، نخستین و اصلی‌ترین چالش در استفاده از شاخص‌های کیفیت آب توسعه داده شده برای پیکره‌های آبی با داده‌های محدود می‌باشد. در اکثر رودخانه‌های ایران به جزء برخی بازه‌های محدود که دارای طرح پایش کیفی مستمر و جامع می‌باشند، پارامترهای کیفی در دسترس به پارامترهای پایه‌ای که در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری می‌شوند، محدود است. این محدودیت در پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده با مشخصات زمانی و مکانی مناسب، دلیل اصلی توسعه شاخص کیفی معرفی شده در تحقیق حاضر می‌باشد. دو اصل در انتخاب پارامترهای کیفیت آب تحقیق حاضر ملاک قرار گرفته است.

3- Turbidity
4- Suspended Solids (SS)
5- Total Dissolved Solids (TDS)
6- Fecal Coliforms (FC)
7- Dissolved Oxygen (DO)
8- Biochemical Oxygen Demand (BOD)



شکل ۲– محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه

Figure 2- Location of the case study and *Astaneh* and *Rudbar* hydrometric stations

نخست پارامترهای موجود و در دسترس (دسترسی آسان به پارامترها در تمامی رودخانه‌ها با دارابودن حداقل یک ایستگاه هیدرومتری) و دومی معیار قرار دادن مصارف شرب (با توجه به محدودیت منابع آب زیرزمینی جهت مصارف شرب) به عنوان ملاک‌های انتخاب پارامترهای کیفیت آب در تحقیق حاضر است.

زیرشاخص‌سازی[1] پارامترها

هدف اولیه از مرحله زیرشاخص‌سازی تبدیل غلظت پارامترهای با واحدهای مختلف به مقادیر بدون بعد متناظر با مقدار غلظت اندازه‌گیری شده‌ی هر پارامتر در زمان و مکان مختلف می‌باشد (Abbasi and Abbasi, 2012). برخی از شاخص‌ها از دستورالعمل‌های استاندارد برای زیرشاخص‌سازی پارامترها استفاده کرده‌اند (Abbasi and Abbasi, 2012; Liou *et al.*, 2004; Sutadian *et al.*, 2016). در حالی‌که برخی از شاخص‌ها مانند شاخص CCME-WQI[2] مرحله زیرشاخص‌سازی را حذف کرده و تجمیع شاخص را با لحاظ مستقیم غلظت پارامترها بدون زیرشاخص‌سازی انجام داده‌اند (Neary *et al.*, 2001).

سه روش شامل استفاده مستقیم از غلظت پارامترها[3] بدون بی‌بعد سازی ، توابع میان‌یابی خطی[4]، توابع منحنی رتبه‌بندی[5] برای مرحله زیرشاخص‌سازی انواع پارامترهای کیفی مورد استفاده شده است. شاخص‌هایی مانند هورتن[6]، دینیوس[7]، دالماتین[8]، لیو[9] و ساید[10] بدون

1- Sub-indexing

2- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) WQI
3- Parameter concentrations
4- Linear interpolated functions
5- Rating curve functions
6- Horton index
7- Dinius index
8- Dalmatian index
9- Liou index
10- Said index

تغییر در مقادیر غلظت پارامترها از آنها به عنوان مقادیر مورد استفاده در محاسبه شاخص کیفیت آب استفاده کردند. همچنین شاخص‌هایی مانند شاخص کیفیت محیطزیست[۱] (EQI)، شاخص دریاچه بزرگ نیرشر[۲] (GLNI) و شاخص کیفیت آب رودخانه مالزی[۳] (MRWQI) (MRWQI) از روش توابع منحنی رتبه‌بندی برای زیرشاخص‌سازی پارامترها در شاخص کیفیت مورد نظر استفاده کرده‌اند. مشابه شاخص‌های NSF-WQI و WJWQI[۴]، در تحقیق حاضر از روش توابع میان‌یابی خطی به منظور زیرشاخص‌سازی پارامترهای کیفیت آب استفاده شده است (Uddin *et al*., 2021). جزئیات این روش در ادامه توضیح داده شده است.

توابع میان‌یابی خطی

مقیاس پارامترها در این روش در محدوده ۰ تا ۱۰۰ قرار می‌گیرند. هنگامی‌که مقدار غلظت پارامتر پایین‌تر از حد مجاز باشد مقدار ۱۰۰ و در غیر این‌صورت مقدار صفر به پارامتر اختصاص داده می‌شود (Lobato *et al*., 2015; Hoseinzadeh *et al*., 2015; Misaghi *et al.*, 2017; Medeiros *et al.*, 2017). در تحقیق حاضر بر اساس این طبقه‌بندی و مشابه با شاخص WJWQI از دو رابطه (۱) و (۲) برای مرحله زیرشاخص‌سازی پارامترها استفاده شده است.

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_i - X_1}{X_2 - X_1} \right) \right] \quad (۱)$$

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_1 - X_i}{X_1 - X_2} \right) \right] \quad (۲)$$

در رابط (۱) و (۲)، S_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده برای پارامتر کیفیت آب اام محاسبه شده برای مقدار غلظت X_i، S_1 و S_2 حداکثر و حداقل مقادیر زیرشاخص‌سازی شده برای مقادیر حداکثر (X_1) و حداقل (X_2) بر اساس راهنمای موردنظر می‌باشد. رابطه (۱) برای مقادیر اندازه‌گیری شده بالاتر از حد مجاز و رابطه (۲) برای مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر از حد مجاز استفاده می‌شود (Dunnette, 1979; Sutadian *et al*., 2016). با توجه به کاربرد شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر به منظور مصارف شرب، استاندارد شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای مشخص کردن مقادیر حداکثر و حداقل (X1 و X2) در روابط (۱) و (۲) استفاده شده است. مقادیر متغیرهای S_1 و S_2 در روابط (۱) و (۲) باتوجه به روش مورد استفاده به ترتیب برابر ۱۰۰ و صفر می‌باشد. به عبارتی حدود مقادیر پارامترهای کیفیت آب بعد از زیرشاخص‌سازی شدن بین صفر تا صد متغیر خواهد بود. مقادیر سایر متغیرهای مورد نیاز در روابط (۱) و (۲)، شامل X_1، X_2 و حد مجاز WHO، برای محاسبه مقادیر زیرشاخص‌سازی شده‌ی پارامترهای کیفیت آب (S_i) در جدول ۱ ارائه شده است.

وزن‌دهی پارامترها

به طور کلی، وزن پارامترها بر اساس اهمیت نسبی پارامترهای کیفی یا بر طبق استانداردهای مناسب برآورد می‌شود. اکثر شاخص‌های کیفی توسعه داده شده برای پارامترهای مورد استفاده وزن‌هایی نابرابر و با مجموع برابر با یک درنظر گرفته‌اند (Sarkar and Abbasi, 2006). با توجه به تابع تجمیع به کار رفته برای محاسبه شاخص WQI، وزن مربوط به هر پارامتر کیفی تاثیر زیادی روی عدد نهایی محاسبه شده دارد. بر اساس نوع استفاده (شرب، کشاورزی، محیطزیست و ...) از شاخص کیفیت آب وزن‌های اختصاص داده شده به هر پارامتر متفاوت است. دو روش وزن‌دهی یکی بر اساس نظرات کارشناسان و دیگری استفاده از تحلیل سلسله مراتبی[۵] (AHP) در توسعه بسیاری از شاخص‌های کیفیت آب استفاده استفاده شده است (Sutadian *et al.*, 2017; Sarkar and Abbasi, 2006; Uddin *et al*., 2021).

در تحقیق حاضر به منظور تعیین وزن برای پارامترهای کیفیت آب از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی[۶] (PCA) استفاده شده است. در این روش با در نظر گرفتن مقادیر میانگین بردارهای ویژه (α_i) مربوط به ۱۰ مولفه اصلی اول، بردار وزنی مربوط به پارامترهای کیفی i تا j (Ω_i) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\Omega_i = \sum_{i=1}^{j} \lambda_i \alpha_i / P^{(j)} \quad (۳)$$

$$P^{(j)} = \sum_{i=1}^{j} \lambda_i \quad (۴)$$

در رابطه (۳)، λ_i واریانس مولفه اصلی اام و $P^{(j)}$ واریانس تجمعی (رابطه ۴) تا مولفه اصلی jام می‌باشد. وزن نهایی پارامترها با توجه به مقادیر محاسبه شده Ω_i برای هر پارامتر i محاسبه می‌شود (Casillas *et al*., 2021).

1- Environmental Quality Index (EQI)
2- Great Lakes Nearshore index (GLNI)
3- Malaysia river WQI (MRWQI)
4- West Java WQI (WJWQI)
5- Analytic Hierarchy Process (AHP)
6- Principal Component Analysis (PCA)

جدول ۱- مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای کیفیت آب و حدود مجاز استاندارد WHO (Cotruvo, 2017)

Table 1- The maximum and minimum of water quality parameters and standard allowable threshold of WHO (Cotruvo, 2017)

پارامتر Parameters	واحد Unit	استاندارد WHO، ۲۰۱۷ WHO standard, 2017 حد مجاز Standard allowable threshold	ایستگاه رودبار Rudbar station		ایستگاه آستانه Astaneh station	
			حداقل Minimum (X_2)	حداکثر Maximum (X_1)	حداقل Minimum (X_2)	حداکثر Maximum (X_1)
TDS	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	1000	327	1920	137	1472
EC	میکروزیمس بر سانتی‌متر ($\mu S\ cm^{-1}$)	-	520	2861	130	2336
TH	میلی‌گرم بر لیتر $CaCO_3$ $mg\ L^{-1}$ of $CaCO_3$	300	180	830	94	500
pH	–	6.5-8.5	5.7	8.6	6.4	11.5
Cl^-	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	250	14	737	5	553
SO_4^{2-}	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	500	16	800	10	354
CO_3^{2-}	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	-	0	9	0	15
HCO_3^-	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	120	66	659	79	409
Mg^{2+}	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	30	0	104	2	67
Na^+	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	200	15	421	3	360
Ca^{2+}	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	300	28	205	26	142
K^+	میلی‌گرم بر لیتر ($mg\ L^{-1}$)	12	0	12	0	10

تجمیع و ارزیابی شاخص

تجمیع شاخص کیفی آخرین مرحله از توسعه یک شاخص می‌باشد. در این مرحله با استفاده از پارامترهای زیرشاخص‌سازی شده و وزن‌های مربوط به هر پارامتر، یک عدد به عنوان امتیازی برای کیفیت آب بدست می‌آید. تابع تجمیع شاخص کیفی می‌تواند به صورت توابع جمع‌پذیر[۱]، ضرب‌پذیر[۲] و یا ترکیبی[۳] از این دو تابع باشد (Sutadian et al., 2016). در تحقیق حاضر مشابه با شاخص‌هایی مانند هورتون و NSFWQI از تابع جمع‌پذیر برای تجمیع شاخص کیفی مطابق با رابطه (۵) استفاده شده است.

$$SDWQI = \sum_{i=1}^{n} w_i Q_i \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، SDWQI شاخص کیفی محاسبه شده $(0 \le SDWQI \le 100)$، w_i وزن مربوط به پارامتر کیفی iام $(0 < w_i < 1)$، و Q_i مقدار پارامتر زیرشاخص‌سازی شده برای پارامترهای کیفی i ام، $(0 \le Q_i \le 100)$ می‌باشد (Rai et al., ; Uddin et al., 20212011). طبقه مربوط به شاخص کیفی با توجه به عدد نهایی محاسبه شده برای شاخص WQI مطابق با جدول ۲ مشخص شده است.

طبقه‌بندی شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر (جدول ۲) مطابق با شاخص NSFWQI در نظر گرفته شده است. بر این اساس عدد صفر نشان‌دهنده بدترین کیفیت آب و هر چه این عدد به سمت ۱۰۰ بیشتر شود، بیانگر کیفیت مطلوب‌تر آب خواهد بود(Uddin et al., 2021).

به منظور ارزیابی نتایج شاخص توسعه داده شده باید نتایج حاصل از آن با یک طبقه‌بندی یا شاخص کیفی دیگر مقایسه شود. در تحقیق حاضر نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با نتایج شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی[۴] (WQI_{WHO}) و طبقه‌بندی شولر مقایسه شده است.

1 Additive functions
2 Multiplicative functions
3 Combination functions

4- Water Quality Index World Health Organization (WQIWHO)

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس مقدار شاخص محاسبه شده (Uddin *et al.*, 2021)

Table 2- Water Quality classification based on value of calculated index (Uddin *et al.*, 2021)

کلاس کیفیت Class of quality	خیلی بد Very bad	بد Bad	متوسط Medium	خوب Good	عالی Excellent
حدود شاخص کیفیت Boundary of quality index	0 - 24	25 - 49	50 - 69	70 - 89	90 - 100

جدول ۳- دسته‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر (Babanezhad *et al.*, 2018Schoeller, 1965;)

Table 3- Schoeller classification for drinking water quality (Schoeller, 1965; Babanezhad *et al.*, 2018)

رتبه Rank	کلاس class	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	TDS	TH	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}
1	خوب Good	<100	<25	<120	<522	<262	<184	<145	<182
2	قابل قبول Permissible	100-198	25-49	120-238	522-1003	262-517	184-362	145-288	182-358
3	نسبتا مناسب Moderately suitable	198-384	49-95	238-456	1003-1996	517-996	362-700	288-590	358-737
4	نامناسب Unsuitable	384-770	95-194	456-928	1996-4050	996-2010	700-1420	590-1198	737-1495
۵	کاملاً نامناسب Quite unsuitable	770-2500	194-387	928-1886	4050-8100	2010-4010	1420-2830	1198-2385	1495-2955
6	غیرقابل شرب Non drinking	>2500	>387	>1886	>8100	>4010	>2830	>2385	>2955

* واحد تمامی پارامترهای کیفیت آب بر حسب میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

دلایل انتخاب طبقه‌بندی شولر جهت اعتبارسنجی نتایج شاخص تحقیق حاضر شامل الف) معتبر بودن و کاربرد بسیار زیاد طبقه‌بندی شولر در تحقیقات گذشته جهت مصارف آب شرب، ب) یکسان بودن پارامترهای کیفیت آب مورد استفاده در شاخص تحقیق حاضر و طبقه‌بندی شولر و ج) عدم نیاز به محاسبات جدید برای طبقه‌بندی شولر و وجود دسته‌بندی جدول و نموداری برای آن می‌باشد.

به منظور اعتبارسنجی مقادیر شاخص تحقیق حاضر، کلاس کیفیت تشخیص داده شده با استفاده از این شاخص با طبقه بدست آمده از طبقه‌بندی شولر مقایسه شده است. طبقه‌بندی شولر اولین بار در سال ۱۹۶۵ به منظور ارزیابی کیفیت آب به منظور مصارف شرب انجام شده است (Schoeller 1965, 1967). این طبقه‌بندی بر اساس ۸ پارامتر کلسیم، منیزیم، سدیم، سولفات، کلر، بی‌کربنات، سختی کل و کل مواد جامد محلول مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود.

جهت اعتبارسنجی شاخص کیفیت آب توسعه داده شده در تحقیق حاضر برای کل ماه‌های نمونه‌برداری (۳۷۲ ماه) کلاس کیفیت آب بر اساس شاخص و طبقه‌بندی شولر مشخص و با یکدیگر مقایسه شده است.

شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WQI_{WHO})

کیفیت و درجه تناسب آب جهت مصارف شرب می‌تواند با استفاده از یک شاخص کیفی مشخص شود. در برخی از شاخص‌های کیفیت آب، استانداردهای شرب مانند استاندارد شرب WHO، به عنوان یک دستورالعمل حدود مجاز مورد استفاده قرار می‌گیرند (Varol and ;Adimalla *et al.*, 2018 ;; Yadav *et al.*, 2015Davraz, 2015 Verma *et al.*, 2020). حدود مجاز و وزن‌های برخی از پارامترهای کیفیت آب جهت مصارف شرب بر اساس استاندارد WHO, 2017 در جدول ۴ ارائه شده است.

وزن مطلق (w_i) پارامترها در جدول ۴ بر اساس درجه اهمیت هر پارامتر به منظور مصارف شرب عددی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. حداکثر وزن مطلق پارامترها با توجه به اهمیت زیاد آنها در کیفیت آب شرب به پارامترهای TDS، Cl^-، SO_4^{2-} و NO_3^- و برابر ۵ و حداقل آن به پارامتر HCO_3^- و برابر یک، اختصاص داده شده است (Tiwari *et al.*, 2018Vasanthavigar *et al.*, 2010;). وزن نسبی (W_i) پارامترها در جدول ۴ با استفاده از نسبت وزن مطلق هر پارامتر تقسیم بر مجموع وزن کل پارامترها (رابطه ۶) محاسبه می‌شود.

جدول ٤- وزن و حدود مجاز پارامترهای کیفیت آب در شاخص شرب WHO (Jesuraja *et al.*, 2021)

Table 4- Weight and threshold of water quality parameters in drinking WHO index (Jesuraja *et al.*, 2021)

پارامتر Parameter	وزن مطلق Absolute weight (w_i)	وزن نسبی Relative weight (W_i)	حد مجاز WHO, 2017 Threshold of WHO, 2017 (mg L^{-1})
pH	3	0.083	8.5
TDS	5	0.139	500
HCO_3^-	1	0.028	300
Cl^-	5	0.139	250
SO_4^{2-}	5	0.139	400
NO_3^-	5	0.139	45
Ca^{2+}	3	0.083	75
Mg^{2+}	3	0.083	50
Na^+	4	0.111	200
K^+	2	0.056	10
مجموع	36	1	-

جدول ٥- طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس مقدار شاخص WQI_{WHO} (Jesuraja *et al.*, 2021)

Table 5- Water Quality classification based on WQI_{WHO} (Jesuraja *et al.*, 2021)

کلاس کیفیت Quality class	عالی Excellent	خوب Good	ضعیف Fair	خیلی ضعیف Very Fair	غیرقابل شرب Non drinking
حدود شاخص کیفیت Threshold of quality index	< 50	50 - 100	100 - 200	200 – 300	> 300

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، W_i و w_i به ترتیب وزن نسبی و وزن مطلق پارامتر کیفی iام و n تعداد کل پارامترهای کیفی می‌باشد. مقادیر پارامترهای کیفی به منظور محاسبه شاخص WHO با استفاده از رابطه (۷) زیرشاخص‌سازی می‌شوند.

$$q_i = C_i / S_i \times 100 \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، q_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده پارامتر iام، C_i غلظت هر پارامتر در نمونه و S_i مقدار مجاز هر پارامتر بر اساس استاندارد شرب WHO به میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. در مرحله آخر مقدار شاخص WQI_{WHO} از مجموع حاصل‌ضرب وزن نسبی هر پارامتر در مقدار زیرشاخص‌سازی شده‌ی آن محاسبه می‌شود (رابطه ۸).

$$WQI_{WHO} = \sum_{i=1}^{n} w_i q_i \quad (۸)$$

در رابطه (۸) w_i وزن نسبی هر پارامتر iام، q_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده‌ی پارامتر و WQI_{WHO} مقدار محاسبه شده شاخص کیفی برای هر نمونه آب می‌باشد. دسته کیفیت آب بر اساس مقدار شاخص WQI_{WHO} بر اساس جدول ۵ می‌باشد.

نتایج و بحث

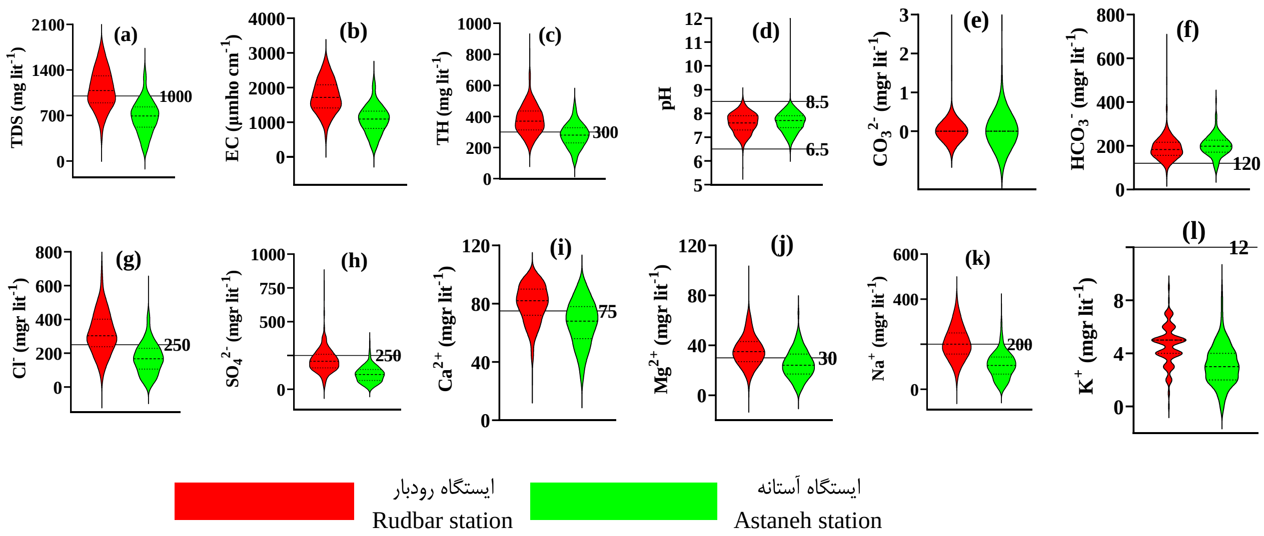
نتایج تحقیق حاضر بر اساس مراحل شرح داده شده در بخش مواد و روش‌ها (شکل ۱) ارائه شده است. بر این اساس ابتدا نتایج پردازش داده‌ها (حدود تغییرات، ضریب همبستگی و خوشه‌بندی) و در ادامه نتایج چهار مرحله توسعه شاخص (انتخاب پارامترها، زیرشاخص‌سازی، وزن‌دهی و تجمیع شاخص) ارائه شده است. در انتهای بخش نتایج ارزیابی نتایج شاخص توسعه داده شده ارائه شده است.

پیش پردازش داده‌ها

بررسی محدوده تغییرات پارامترهای کیفی به منظور تعیین تغییرات کلی مقادیر پارامترها در ۳۴ سال آمار مورد مطالعه (۱۳۶۶-۱۳۹۹) انجام شده است. نمودار ویولن[1] برای ۱۲ پارامتر کیفیت آب مورد بررسی در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۳ بیانگر بالاتر بودن میانه مقادیر متغیرهای TDS، EC، TH، کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه می‌باشد. دلیل بالاتر بودن مقادیر این متغیرها در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه می‌تواند عوامل مختلفی مانند اثرات دریاچه سد سفیدرود (حلالیت، لایه‌بندی حرارتی، تغذیه‌گرایی و ...) روی متغیرهای کیفیت آب در ایستگاه رودبار (بعد از سد) و یا اضافه‌شدن شاخه‌های فرعی (توتکابن، رشته‌رود، ذیلکی‌رود و ...) به رودخانه سفیدرود در پایین‌دست ایستگاه رودبار و در نتیجه بهبود متغیرهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه باشد.

1- Violin plot



شکل ۳- حدود پارامترهای کیفیت آب ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه (۱۳٦٦-۹۹)

Figure 3- Variation of monthly water quality parameters measured in Rudbar and Astaneh stations (1987- 2017)

جدول ٦- مقادیر و معنی‌داری ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای کیفیت آب ایستگاه‌های رودبار (الف) و آستانه (ب)

Table 6- Pearson correlation coefficient and significant level between water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

الف-رودبار A-Rudbar	TDS	EC	TH	pH	CO_3^{-2}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+
TDS	1											
EC	**	1										
TH	**	**	1									
pH	ns	ns	ns	1								
CO_3^{-2}	ns	ns	ns	*	1							
HCO_3^-	*	*	*	ns	ns	1						
Cl^-	**	**	**	ns	ns	*	1					
SO_4^{-2}	*	*	*	ns	ns	ns	ns	1				
Ca^{+2}	**	**	**	ns	ns	*	*	*	1			
Mg^{+2}	**	**	**	ns	ns	*	*	*	*	1		
Na^+	**	**	*	ns	ns	*	**	*	*	*	1	
K^+	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	1

ب- آستانه b-Astaneh	TDS	EC	TH	pH	CO_3^{-2}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+
TDS	1											
EC	**	1										
TH	**	**	1									
pH	ns	ns	ns	1								
CO_3^{-2}	ns	ns	ns	*	1							
HCO_3^-	*	*	*	ns	ns	1						
Cl^-	**	**	**	ns	ns	*	1					
SO_4^{-2}	**	**	**	ns	ns	*	**	1				
Ca^{+2}	**	**	**	ns	ns	*	*	*	1			
Mg^{+2}	**	**	**	ns	ns	*	**	*	*	1		
Na^+	**	**	**	ns	ns	*	**	**	*	**	1	
K^+	*	*	*	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	1

ضریب همبستگی پیرسون Pearson correlation coefficient	-0.1- 0.0	0.0- 0.2	0.2- 0.4	0.4- 0.6	0.6- 0.8	0.8- 0.9	0.9- 1.0
رنگ (Color)							

سطوح معنی‌داری همبستگی Significant level: ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌داری همبستگی و معنی‌داری در سطوح معنی‌داری ۵ و یک درصد

ns, * and ** are non-significant, and significant at 5% and 1%, respectively.

بر اساس شکل ۳ بیشتر از ۵۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای کیفی شامل TDS، TH، بی‌کربنات، کلر، کلسیم و منیزیم در ایستگاه رودبار فراتر از حد مجاز استاندارد WHO (جدول ۱) قرار دارند. به عبارتی میانه‌ی این پارامترها بالاتر از حد مجاز قرار گرفته است. این در حالی‌است که در ایستگاه آستانه تنها میانه مقادیر بی‌کربنات (شکل ۳f) بالاتر از مقدار مجاز قرار دارد و در مورد سایر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه شامل TDS، pH، کلر، سولفات و سدیم، ۷۵ درصد داده‌ها (چارک سوم) کمتر از

حد مجاز می‌باشد.

ماتریس همبستگی

بررسی همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب به منظور مشخص کردن ارتباط بین انواع پارامترها انجام می‌شود. جدول ۶، مقادیر همبستگی بین این متغیرها را در دو ایستگاه هیدرومتری رودبار و آستانه نشان می‌دهد.

بر اساس جدول ۶، از بین ۱۱ متغیر کیفیت آب مورد بررسی دو پارامتر pH و CO_3^{2-} کمترین مقادیر ضریب همبستگی را با سایر متغیرهای کیفی دارند، به نحوی‌که این دو متغیر تنها با یکدیگر مقدار همبستگی معنی‌داری در سطح پنج درصد دارند. از طرف دیگر بیشتر همبستگی بین متغیرهای TDS و EC با سایر متغیرهای کیفی مورد بررسی وجود دارد به نحوی‌که این دو متغیر با تمامی متغیرها به جزء pH و CO_3^{2-} ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح یک یا پنج درصد دارند. همچنین بالاترین ضریب همبستگی پیرسون در بین متغیرهای مورد بررسی مربوط به دو پارامتر TDS و EC و برابر ۰/۹۹ برای هر دو ایستگاه رودبار و آستانه است. بین دو ایستگاه رودبار و آستانه تفاوت در برخی مقادیر ضریب همبستگی بین متغیرهای یکسان زیاد است. به عنوان نمونه مقدار همبستگی بین سولفات و کلر در ایستگاه رودبار برابر ۰/۰۷ و غیرمعنی‌دار و در ایستگاه آستانه برابر ۰/۶۸ و معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد. مشابه این تفاوت‌ها در مقادیر ضریب همبستگی بین متغیرهای پتاسیم- منیزیم و پتاسیم- کلسیم نیز مشاهده می‌شود که در ایستگاه رودبار رابطه‌ای غیرمعنی‌دار و در ایستگاه آستانه معنی‌داری در سطح پنج درصد دارند.

خوشه بندی[1]

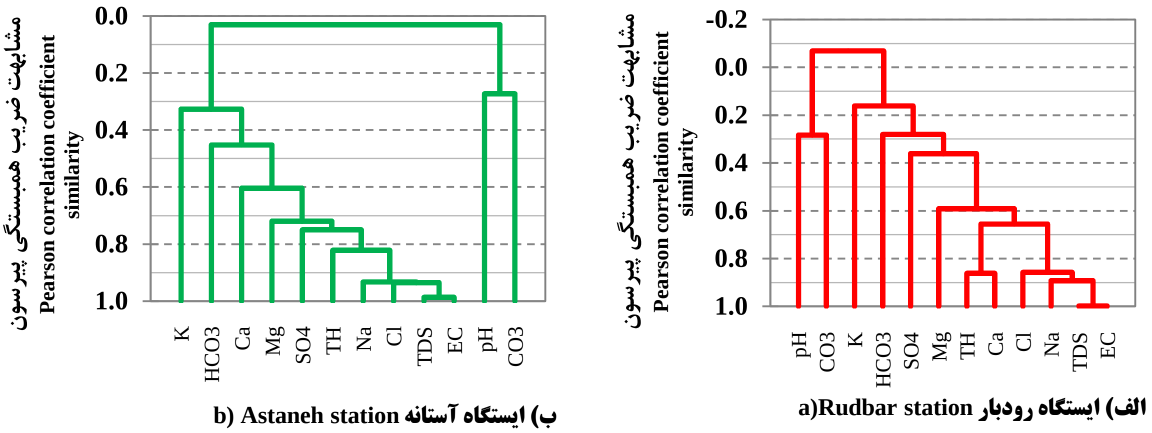
هدف از خوشه‌بندی پارامترهای کیفیت آب، ارزیابی و دسته‌بندی پارامترهای کیفیت آب به لحاظ مشابهت‌های بین آنها می‌باشد. در تحقیق حاضر به منظور خوشه‌بندی ۱۲ پارامتر کیفیت آب از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی[2] (AHC) استفاده شده است. در این روش با استفاده از مشابهت[3] پارامترهای کیفیت آب از لحاظ ضریب همبستگی پیرسون خوشه‌بندی انجام شده است. دندروگرام حاصل از خوشه بندی پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار و آستانه در شکل ۴ نشان داده شده است.

تعداد خوشه‌ها در نمودار دندروگرام با توجه به موقعیت برش[4] شاخه‌های دندروگرام بستگی دارد. به عنوان مثال اگر جهت تعیین تعداد خوشه‌ها در شکل ۴، مقدار مشابهت ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰/۸۰ در نظر گرفته شود، هشت خوشه برای ۱۲ پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشخص می‌شود. بر این اساس در ایستگاه رودبار (شکل ۴-الف)، پارامترهای TDS، EC، Cl^- و Na^+ در خوشه ۱، Ca^{2+} و TH در خوشه ۲ و سایر پارامترها شامل Mg^{2+}، SO_4^{2-}، HCO_3^-، K^+، CO_3^{2-} و pH هر کدام در خوشه‌های ۳ تا ۸ قرار می‌گیرند. همچنین در ایستگاه آستانه (شکل ۴-ب)، پارامترهای EC، TDS، Cl^-، Na^+ و TH در خوشه ۱ و سایر پارامترها شامل Ca^{2+}، Mg^{2+}، SO_4^{2-}، HCO_3^-، K^+، CO_3^{2-} و pH هر کدام در خوشه‌های ۲ تا ۸ قرار می‌گیرند. این خوشه‌بندی بیانگر نتایج همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب (جدول ۶) می‌باشد.

انتخاب پارامترهای شاخص

در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل همبستگی و روش‌های چندمتغیره آماری شامل خوشه‌بندی و PCA پارامترهای مورد استفاده در شاخص معرفی شده، انتخاب شده است. در پیش‌پردازش اولیه داده‌های کیفیت آب مشخص شد که اکثر مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامتر CO_3^{2-} برابر صفر ثبت شده است. به طوری‌که از ۳۷۲ داده اندازه‌گیری شده از پارامتر کربنات، ۳۵۸ داده (۹۶ درصد) در ایستگاه رودبار و ۳۵۰ داده (۹۴ درصد) در ایستگاه آستانه برابر صفر ثبت شده است (شکل 3e). به این ترتیب به دلیل صفر بودن مقدار پارامتر کربنات در اکثر ماه‌های اندازه‌گیری شده، این پارامتر از پارامترهای مورد استفاده در شاخص حذف شد.

1- Clustering
2- Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC)
3- Similarity
4- Truncation



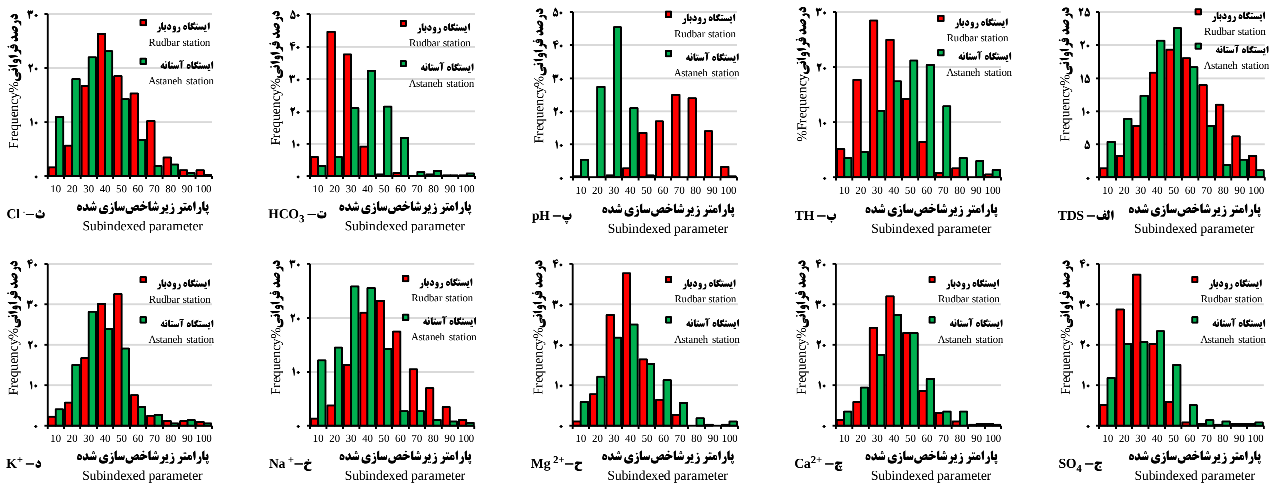
شکل ٤- دندروگرام پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار (الف) و آستانه (ب)

Figure 4- Dendrogram of water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

همچنین با توجه به همبستگی بالای بین پارامترهای TDS و EC (ضریب همبستگی پیرسون حدود ۹۹ درصد) و قرار گرفتن این دو پارامتر در یک خوشه (شکل ۴)، از بین دو، پارامتر TDS به دلیل مهم‌تر بودن جهت مصارف شرب (قرار داشتن جزء پارامترهای استاندارد WHO) و قرار داشتن در اکثر شاخص‌های کیفی به عنوان اولین پارامتر شاخص انتخاب شد. با توجه به هدف استفاده حداکثری از داده‌های اندازه‌گیری شده و لحاظ تمام پارامترهای موثر جهت مصارف شرب در شاخص توسعه داده شده، سایر پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در توسعه شاخص کیفی تحقیق حاضر استفاده شده است. به عبارتی پارامترهای انتخاب شده جهت توسعه شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر دارای ۱۰ پارامتر کیفیت آب شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) می‌باشد.

زیرشاخص‌سازی پارامترها

زیرشاخص‌سازی برای ۱۰ پارامتر کیفی انتخاب شده با استفاده از روابط (۱ و ۲) انجام شده است. بر این اساس مقادیر پارامترها به عددی بی‌بعد بین صفر تا ۱۰۰ تبدیل می‌شود تا همزمان اثر واحدها و دامنه تغییرات متفاوت پارامترها در مقدار شاخص کیفی اثرگذار نباشد. فراوانی پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه پس از مرحله زیرشاخص‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- فراوانی مقادیر پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه پس از مرحله زیرشاخص‌سازی

Figure 5- Frequency of water quality parameters in Rudbar and Astaneh stations after sub-indexing step

جدول ۷- مقادیر بردار ویژه، سهم پارامترها و ضریب امتیاز مولفه‌های اصلی ۱ و ۲ پارامترهای کیفی

Table 7- Eigenvectors, contribution and scores of quality parameters principal components 1 and 2

پارامتر Parameter	ایستگاه رودبار Rudbar st. بردار ویژه Eigenvector		ایستگاه آستانه Astaneh st. بردار ویژه Eigenvector		ایستگاه رودبار Rudbar st. سهم پارامترها Contribution		ایستگاه آستانه Astaneh st. سهم پارامترها Contribution		ایستگاه رودبار Rudbar st. ضریب امتیاز Score		ایستگاه آستانه Astaneh st. ضریب امتیاز Score	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
TDS	0.41	0.05	0.38	-0.01	16.5	0.2	14.2	0.0	0.17	0.05	0.14	-0.01
EC	0.41	0.06	0.37	-0.01	16.5	0.2	13.9	0.0	0.17	0.05	0.14	0.00
TH	0.37	-0.07	0.36	-0.01	13.8	0.6	12.8	0.0	0.15	-0.06	0.14	-0.01
pH	-0.05	0.43	0.02	0.69	0.2	18.5	0.0	48.0	-0.02	0.37	-0.01	0.61
CO_3^{2-}	-0.05	0.32	0.01	0.71	0.2	10.4	0.0	49.8	-0.02	0.28	-0.01	0.62
HCO_3^-	0.17	-0.50	0.22	-0.03	2.9	25.1	4.7	0.0	0.07	-0.43	0.08	-0.02
Cl^-	0.35	-0.10	0.35	-0.07	12.5	1.0	12.5	0.2	0.15	-0.09	0.14	0.05
SO_4^{2-}	0.19	0.52	0.31	0.10	3.8	27.2	9.7	1.4	0.08	0.45	0.12	0.09
Ca^{2+}	0.32	0.03	0.28	-0.06	10.5	0.1	8.0	0.2	0.13	0.03	0.11	-0.05
Mg^{2+}	0.31	-0.15	0.30	0.04	9.4	2.5	9.2	0.3	0.13	-0.13	0.11	0.04
Na^+	0.35	0.10	0.35	-0.01	12.5	0.9	12.2	0.0	0.15	0.09	0.13	-0.01
K^+	0.11	0.36	0.17	-0.01	1.3	13.2	2.8	0.0	0.05	0.31	0.06	-0.01

توزیع اکثر پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی در شکل ۵ در ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشابه یکدیگر می‌باشند. البته تفاوت نسبتاً زیادی در توزیع پارامترهای TH (شکل ۵-ب)، pH (شکل ۵-پ) و HCO_3^- (شکل ۵-ت) بین ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشخص می‌باشد. به طوری‌که حدود ۹۷ مقادیر زیرشاخص‌سازی شده پارامتر pH در ایستگاه رودبار بیشتر از ۵۰ می‌باشد، اما حدود ۹۹ درصد مقادیر این پارامتر در ایستگاه آستانه کمتر از ۵۰ می‌باشد. علت تفاوت بسیار زیاد توزیع داده‌های پارامتر pH در دو ایستگاه رودبار و آستانه، مقدار ماکزیمم برابر ۱۱/۵ (متغیر X_1 برای پارامتر pH) در ایستگاه آستانه می‌باشد. چون این عدد بزرگ باعث بزرگ شدن مخرج کسر در روابط (۱) و (۲) شده و در نتیجه کوچکتر شدن مقدار زیرشاخص‌سازی شده پارامتر می‌شود. در مورد پارامترهای TH و HCO_3^- نیز مقدار حداکثر اندازه‌گیری شده این پارامترها در ایستگاه رودبار (جدول ۱) نیز باعث کوچک شدن مقادیر زیرشاخص‌سازی شده‌ی این پارامترها در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه شده است.

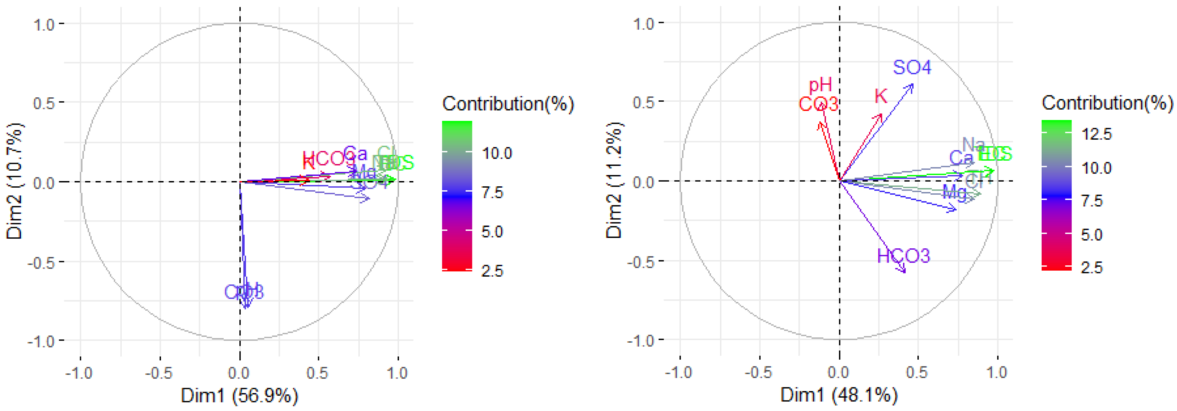
تعیین وزن پارامترها

به منظور محاسبه وزن مربوط به پارامترهای کیفیت آب انتخاب شده از روش PCA استفاده شده است. با وجود حذف دو پارامتر EC و CO_3^{2-} در مرحله انتخاب پارامترها، به منظور بررسی جامع، هر ۱۲ پارامتر کیفیت آب نیز در این مرحله مورد تحلیل قرار گرفته است. جدول مربوط به بردار ویژه[1]، سهم پارامترها[2] و ضریب امتیاز فاکتورهای اصلی[3] ۱ و ۲ برای پارامترهای کیفی ایستگاه‌های رودبار و آستانه در جدول ۷ ارائه شده است.

مقادیر بردار ویژه در جدول ۷ نشان‌دهنده مهم‌تر بودن پارامترهای کیفیت آب در هر مولفه اصلی می‌باشد. در مولفه‌های اصلی اول (D1) ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب مربوط به پارامترهای TDS، EC، TH، Cl^- و Na^+ می‌باشد. با توجه به متعامد بودن مولفه‌های اصلی یک (D1) و دو (D2)، مقادیر بردارهای ویژه دو پارامتر pH و CO_3^{2-} که در مولفه D1 حداقل می‌باشد در مولفه D2 برای هر دو ایستگاه نسبت به سایر پارامترهای کیفی بیشتر می‌باشد. سهم پارامترها در حقیقت نشان‌دهنده درصد پوشش هر پارامتر از واریانس کل پارامترها در هر مولفه اصلی می‌باشد. در مولفه اصلی اول پارامتر TDS در ایستگاه رودبار و آستانه به ترتیب با سهم ۱۶/۵ و ۱۴/۲ درصد بیشترین سهم از پوشش واریانس کل پارامترها را دارد. همچنین در مولفه اصلی دوم سهم پارامترهای pH و CO_3^{2-} نسبت به سایر پارامترها بیشتر می‌باشد.

ضریب امتیاز مولفه‌ها در حقیقت بیانگر ضریب هر یک از پارامترهای کیفیت آب در هر مولفه می‌باشد. به این ترتیب مولفه اصلی اول در هر دو ایستگاه شامل پارامترهای TDS، EC، TH، Cl^- و Na^+ می‌باشد. پارامترهای موثر در مولفه اصلی دوم در دو ایستگاه رودبار و آستانه متفاوت است.

1- Eigen vectors
2- Contribution of the variables
3- Component score coefficients



ب- ایستگاه هیدرومتری آستانه
b- Astaneh hydrometric station

الف- ایستگاه هیدرومتری رودبار
a- Rudbar hydrometric station

شکل ٦- نمودار تجزیه به مولفه‌های اصلی پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار (الف) و آستانه (ب)

Figure 6- Principal component analysis of water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

به طوری‌که در مولفه اصلی دوم ایستگاه پارامترهای pH، CO_3^{2-}، HCO_3^-، SO_4^{2-} و K^+ دارای ضرایب بزرگتری نسبت به سایر پارامترها و در مولفه اصلی دوم ایستگاه آستانه ضریب پارامترهای pH و CO_3^{2-} نسبت به سایر پارامترها بیشتر می‌باشند. شکل ۶ نمودار دوگانه[1] پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار و آستانه را نشان می‌دهد.

طول بردارها در شکل ۶ بیانگر سهم مشارکت هر یک از پارامترهای کیفیت آب در پوشش واریانس کل پارامترها می‌باشد. بزرگتر بودن طول این بردار نشان‌دهنده سهم و اثر بیشتر آن پارامتر در بین کل پارامترهای مورد بررسی است. شکل ۶ بیانگر سهم حداکثری پارامتر TDS در هر دو ایستگاه رودبار و آستانه نسبت به سایر پارامترهای کیفی می‌باشد. همچنین پارامترهای pH، CO_3^{2-} و K^+ کمترین سهم را در پوشش واریانس کل تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه از خود نشان می‌دهند. مجموع درصد پوشش واریانس کل پارامترهای مورد بررسی در مولفه‌های اصلی اول و دوم ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب برابر ۵۹/۳ درصد (شکل ۶-الف) و ۶۷/۶ درصد (شکل ۶-الف) می‌باشد. این نکته بیانگر پوشش بیشتر مولفه‌های اصلی اول و دوم در ایستگاه آستانه نسبت به ایستگاه رودبار می‌باشد. به عبارتی با توجه به همبستگی قوی‌تر بین پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه نسبت به ایستگاه رودبار، مولفه‌های اصلی قادرند رابطه خطی قوی‌تری بین پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه نسبت به رودبار برقرار سازند. در شکل ۶ کسینوس زاویه بین بردارها بیانگر همبستگی بین پارامترهای کیفی است. به عبارتی هر چه این زاویه کوچکتر باشد، همبستگی بین پارامترها بیشتر می‌باشد. کوچک‌تر بودن زاویه بین پارامترها در ایستگاه آستانه (شکل ۶-ب) نسبت به ایستگاه رودبار (شکل ۶-االف) نشان‌دهنده همبستگی بیشتر پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه می‌باشد. جدول ۸ وزن‌های محاسبه شده برای پارامترهای کیفی انتخاب شده برای توسعه شاخص کیفی تحقیق حاضر را بر اساس رابطه (۳) نشان می‌دهد.

محاسبات شاخص و اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی نتایج شاخص کیفی توسعه داده شده، نتایج شاخص تحقیق حاضر با شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WQI_{WHO}) و طبقه‌بندی شرب شولر مقایسه شده است. شکل ۷ فراوانی (درصد از ۳۷۲ داده کیفیت آب اندازه‌گیری شده) دسته‌بندی شاخص کیفیت آب قرار گرفته در دسته‌های عالی تا بسیار بد (جدول ۲) را برای سه شاخص شامل شاخص جدید توسعه داده شده، شاخص WQI WHO و دسته‌بندی شولر نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۷-الف) بر اساس شاخص WHO، ۹۸/۴ درصد از نمونه‌های کیفیت آب ایستگاه رودبار در دسته‌های خوب و متوسط قرار می‌گیرد. درصد نمونه‌های این دو دسته برای شاخص جدید توسعه داده شده و دسته‌بندی شولر به ترتیب برابر ۸۰/۴ و ۹۷/۶ درصد می‌باشد. بیشترین تفاوت بین فراوانی دسته‌های مختلف بین شاخص‌ها در ایستگاه رودبار (شکل ۷-الف) در دسته کیفیت بد و به ترتیب برابر ۱/۳، ۱۸/۸ و ۱/۹ درصد برای شاخص WHO، شاخص جدید و دسته‌بندی شولر اتفاق افتاده است. بیشترین درصد کیفیت نمونه‌های آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) در دسته خوب برای شاخص WHO، شاخص جدید و دسته‌بندی

1- Biplots

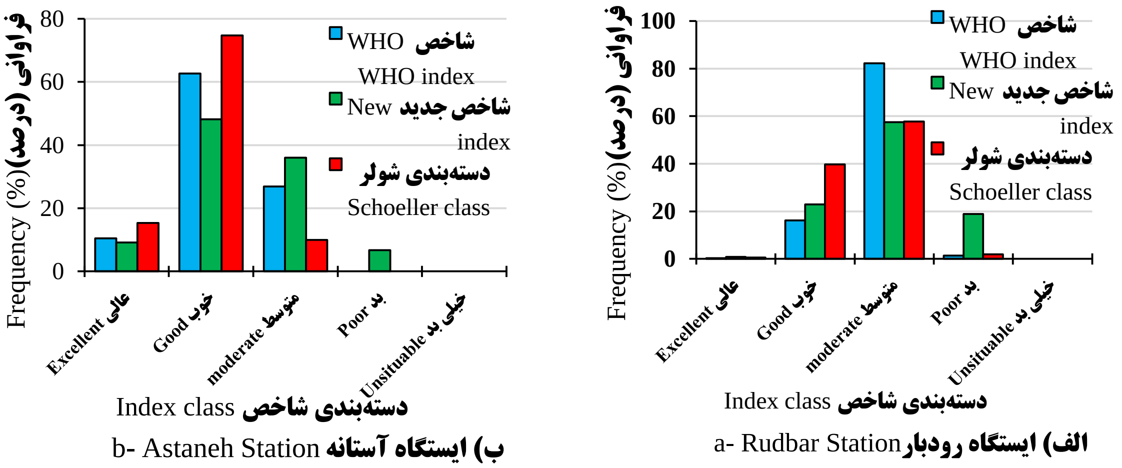
شولر به ترتیب برابر ۶۲/۶، ۴۸/۱ و ۷۴/۷ درصد قرار گرفته است. درصد نمونه‌های دسته کیفیت آب متوسط در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) بر اساس شاخص WHO، شاخص جدید و دسته‌بندی شولر به ترتیب برابر ۲۶/۹، ۳۶/۰ و ۹/۹ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از شکل ۷ حاکی از سخت‌گیرتر بودن شاخص جدید توسعه داده شده نسبت به شاخص WHO و دسته‌بندی شولر می‌باشد. به عبارتی دسته کیفیت آب در شاخص جدید توسعه داده شده نسبت به شاخص WHO و دسته‌بندی شولر در دسته نامناسب‌تری به لحاظ مصارف شرب قرار می‌گیرد. به طوری‌که بیشترین تفاوت فراوانی نمونه‌های قرار گرفته در دو ایستگاه رودبار و آستانه در دسته کیفیت بد می‌باشد. به عنوان مثال در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) از ۳۷۲ نمونه مورد بررسی، در حالی‌که بر اساس شاخص WHO و دسته‌بندی شولر هیچ نمونه‌ای در این دسته قرار نگرفته است، اما بر اساس شاخص جدید ۲۵ نمونه (۶/۷ درصد) جزء کلاس کیفیت بد لحاظ شده است.

با توجه به چهار مرحله‌ی توسعه یک شاخص کیفی (انتخاب پارامترها، زیرشاخص‌سازی، وزن‌دهی و تجمیع شاخص)، تفاوت روش مورد استفاده در هر یک از این مراحل، باعث تفاوت در نتایج حاصل از شاخص خواهد شد. دو مرحله بسیار مهم توسعه شاخص کیفی که بسیار روی نتایج آن اثر دارد، مراحل زیرشاخص‌سازی و وزن‌دهی پارامترها می‌باشد (Uddin *et al.*, 2021). در تحقیق حاضر زیرشاخص‌سازی با استفاده از تابع میان‌یابی خطی (روابط ۱ و ۲) انجام شده است. این روش در عین سادگی به مقادیر حداقل و حداکثر پارامترها بسیار وابسته می‌باشد. به طوری‌که اگر مقادیر حداقل و حداکثر پارامترها به نسبت حدود داده‌ها بسیار متفاوت باشد، توزیع فراوانی پارامترها بعد از زیرشاخص‌سازی شدن از لحاظ پارامترهای میانگین، چولگی و کشیدگی تغییرات زیادی خواهد داشت (شکل ۵-پ).

جدول ۸- وزن محاسبه شده برای پارامترهای کیفیت آب با استفاده از روش PCA

Table 8- The calculated weights for water quality parameters using PCA method

پارامتر کیفیت آب منتخب Selected water quality parameter	TDS	TH	pH	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
میانگین بردارهای ویژه (α_i) Average of Eigenvectors	0.38	0.36	0.19	0.12	0.35	0.31	0.28	0.30	0.35	0.11
واریانس مولفه اصلی (λ_i) Variance of PC	14.32	13.85	2.24	1.71	12.45	9.80	9.95	9.20	12.15	2.82
واریانس تجمعی ($P^{(j)}$) Accumulated variance	33.10	34.95	6.27	4.25	32.59	39.71	27.57	27.40	31.97	9.98
وزن محاسبه شده (Ω_i) Calculated weight	0.163	0.142	0.068	0.048	0.135	0.077	0.102	0.102	0.133	0.031



شکل ۷- فراوانی طبقات شاخص‌های کیفیت آب در ایستگاه رودبار (الف) و آستانه (ب)

Figure 7- The frequency of water quality indices class in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

این مسئله اهمیت انتخاب روشی مناسب مانند استفاده از روش‌های غیرقطعی (فازی) و هوشمند (ماشین یادگیری) به منظور زیرشاخص‌سازی پارامترها را نشان می‌دهد. وزن‌دهی پارامترها نیز با توجه به نوع تابع تجمیع به کار رفته اثر زیادی روی نتایج شاخص کیفیت آب دارد. روش ساده‌ی مورد استفاده در شاخص WHO برای وزن‌دهی به پارامترها از معایب این شاخص می‌باشد. به منظور وزن‌دهی موثرتر به پارامترها باید از روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی، تحلیل فاکتور و تجزیه به مولفه‌های اصلی بهره گرفت.

به طور کلی مقایسه شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص WHO (Cotruvo, 2017) و دسته‌بندی شولر (Schoeller, 1965) نشان‌دهنده سخت‌گیری بیشتر شاخص جدید در دسته‌بندی کیفیت آب جهت مصارف شرب است. هر شاخص کیفیت آب توسعه داده شده به منظور ارزیابی عدم قطعیت و نتایج حاصل از آن، باید در مورد داده‌هایی با مشخصات مختلف از لحاظ دامنه تغییرات با مقادیر حدی (حداقل و حداکثر) متفاوت مورد آزمون قرار داده شود. شاخص توسعه داده شده در تحقیق حاضر نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد و به منظور ارزیابی بهتر نتایج حاصل از آن پیشنهاد می‌شود با داده‌های سایر ایستگاه‌های هیدرومتری مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد. حذف پارامتر کربنات به دلیل صفر بودن مقدار این پارامتر در اکثر ماه‌های اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه مورد مطالعه، نکته‌ای است که ممکن است در سایر ایستگاههای مورد بررسی اتفاق نیفتد و به عبارتی این پارامتر باید جزء پارامترهای مورد بررسی در شاخص، مدنظر قرار گیرد. همچنین یکی از نکات مهم دیگری که باید در استفاده از هر شاخص کیفیت آب از جمله شاخص تحقیق حاضر در نظر گرفته شود، بررسی حدود مجاز پارامترهایی از کیفیت آب است که در این شاخص‌ها در نظر گرفته نشده است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب شرب (SDWQI) با استفاده از پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه‌ی سفیدرود انجام شده است. به این منظور از داده‌های ماهانه ۱۲ پارامتر کیفیت آب شامل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کربنات (CO_3^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) اندازه‌گیری شده طی سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۶۶ در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه واقع روی رودخانه سفیدرود استفاده شده است. به منظور توسعه شاخص جدید، روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی (AHC) و تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از بسته‌های "cluster" و "factoextra" در نرم‌افزار R 4.1.1 به کار رفته است. به منظور توسعه شاخص کیفی علاوه بر انجام چهار مرحله کلی انتخاب پارامترها، زیرشاخص‌سازی، وزن‌دهی و تجمیع شاخص، پردازش‌هایی مانند تحلیل همبستگی نیز روی داده‌ها انجام شده است. همچنین به منظور ارزیابی شاخص تحقیق حاضر، نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص کیفیت آب شرب WHO و دسته‌بندی کیفیت آب شرب شولر مقایسه شده است. آنالیز همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب حاکی از معنی‌داری همبستگی بین پارامترهای TDS، EC و TH با یکدیگر و همچنین با پارامترهای Cl^-، Ca^{2+} و Mg^{+2} در سطح معنی‌داری یک درصد در هر دو ایستگاه آستانه و رودبار دارد. از طرف دیگر کمترین مقادیر ضریب همبستگی پیرسون مربوط به پارامترهای pH و CO_3^{2-} با سایر پارامترهای کیفی و به صورت غیرمعنی‌دار است. نتایج خوشه‌بندی به روش AHC حاکی از قرارگیری اغلب پارامترهای کیفیت آب در خوشه‌هایی مجزا می‌باشد. به طوری‌که تنها پارامترهای TDS، EC، Cl^- و Na^+ در هر دو ایستگاه رودبار و آستانه در یک خوشه قرار می‌گیرند. با توجه به درجه اهمیت پارامترهای کیفیت آب جهت مصارف شرب و تحلیل همبستگی و خوشه‌بندی انجام شده، دو پارامتر EC و CO_3^{2-} از ۱۲ پارامتر مورد بررسی اولیه حذف و ۱۰ پارامتر باقیمانده به منظور توسعه شاخص جدید کیفیت آب استفاده شده است. وزن‌دهی پارامترها با استفاده از روش PCA حاکی از اختصاص بیشترین و کمترین وزن به ترتیب به پارامترهای TDS و K^+ و برابر ۰/۱۶۳ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از پوشش ۵۹/۳ و ۶۷/۶ درصدی مولفه‌های اصلی اول و دوم از واریانس تغییرات کل پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی به ترتیب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد. نتایج دسته‌بندی کیفیت آب بیانگر قرار گرفتن به ترتیب (۴۰/۵، ۱۶/۴ و ۲۳/۷ درصد) و (۹۰/۱، ۷۳/۱ و ۵۷/۳ درصد) داده‌های ایستگاه‌های رودبار و آستانه در رده‌ی خوب و عالی جهت مصارف شرب بر اساس دسته‌بندی شولر، شاخص WHO و شاخص جدید می‌باشد.

منابع

1. Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier.
2. Adimalla, N., & Venkatayogi, S. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science 8*(1): 1-14. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1.
3. Babanezhad, E., Qaderi, F., & Ziri, M.S. (2018). Spatial modeling of groundwater quality based on using Schoeller diagram in GIS base: a case study of Khorramabad, Iran. *Environmental Earth Sciences 77*(9): 1-12. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7541-0.
4. Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., & Tozer, R.G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works 117*(10).
5. Casillas-García, L.F., de Anda, J., Yebra-Montes, C., Shear, H., Díaz-Vázquez, D., & Gradilla-Hernández, M.S. (2021). Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators* 129: 107899. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899.
6. Cotruvo, J.A. (2017). WHO guidelines for drinking water quality: first addendum to the fourth edition. *Journal-American Water Works Association 109*(7): 44-51. https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0087.
7. Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., & Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal 26*(4): 445-454. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x.
8. Dao, V., Urban, W., & Hazra, S.B. (2020). Introducing the modification of Canadian water quality index. *Groundwater for Sustainable Development* 11: 100457. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457.
9. Darapu, S.S.K., Sudhakar, B., Krishna K.S.R., Rao, P.V., & Sekhar, M.C. (2011). Determining water quality index for the evaluation of water quality of river Godavari. *International Journal of Environmental Research and Application* 1: 174-18.
10. Dunnette, D.A. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal of Water Pollution Control Federation* 53-61.
11. Grubbs, F.E. (1950). Sample criteria for testing outlying observations. *The Annals of Mathematical Statistics* 27-58.
12. Horton, R.K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation 37*(3): 300-306.
13. Hoseinzadeh, E., Khorsandi, H., Wei, C., & Alipour, M. (2015). Evaluation of Aydughmush river water quality using the national sanitation foundation water quality index (NSFWQI), river pollution index (RPI), and forestry water quality index (FWQI). *Desalination and Water Treatment 54*(11): 2994-3002. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.913206.
14. Jesuraja, K., Selvam, S., & Murugan, R. (2021). GIS-based assessment of groundwater quality index (DWQI and AWQI) in Tiruchendur Coastal City, Southern Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences 80*(7): 1-17. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09542-5.
15. Kannel, P.R., Lee, S., Lee, Y.S., Kanel, S.R., & Khan, S.P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental monitoring and assessment 132*(1): 93-110. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1.
16. Kumar, S., & Sangeetha, B. (2020). Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 10: 100297. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100297.
17. Liou, S.M., Lo, S.L., & Wang, S.H. (2004). A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment 96*(1): 35-52. https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1.
18. Lobato, T.C., Hauser-Davis, R.A., Oliveira, T.F., Silveira, A.M., Silva, H.A.N., Tavares, M.R.M., & Saraiva, A.C.F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology* 522: 674-683. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021.
19. Ma, Z., Li, H., Ye, Z., Wen, J., Hu, Y., & Liu, Y. (2020). Application of modified water quality index (WQI) in the assessment of coastal water quality in main aquaculture areas of Dalian, China. *Marine Pollution Bulletin* 157: 111285. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111285.
20. Medeiros, A.C., Faial, K.R.F., Faial, K.D.C.F., da Silva Lopes, I.D., de Oliveira Lima, M., Guimarães, R.M., & Mendonça, N.M. (2017). Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Marine Pollution Bulletin 123*(1-2): 156-164. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.002.
21. Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., & Myers, B. (2017). Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River. *Science of the Total Environment* 589: 107-116. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226.
22. Naubi, I., Zardari, N.H., Shirazi, S.M., Ibrahim, N.F.B., & Baloo, L. (2016). Effectiveness of Water Quality Index for Monitoring Malaysian River Water Quality. *Polish Journal of Environmental Studies 25*(1): 231–239.

https://doi.org/10.15244/pjoes/60109.

23. Neary, B., Cash, K., Hebert, S., Khan, H., Saffran, K., Swain, L., & Williamson, D. (2001). Canadian Water quality guidelines for the protection of the aquatic life, CCME water quality index 1.0. Technical Report Canadian Council of Ministers of the Environment.
24. Rai, R.K., Upadhyay, A., Ojha, C.S.P., & Singh, V.P. (2011). *The Yamuna river basin: water resources and environment* (Vol. 66). Springer Science and Business Media.
25. Sarkar, C., & Abbasi, S.A. (2006). Qualidex – A New Software for Generating Water Quality Indice. *Environmental Monitoring and Assessment* 119: 201–231. https://doi.org/10.1007/s10661-005-9023-6.
26. Schoeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development, UNESCO 5483.
27. Schoeller, H. (1967). Geochemistry of groundwater—an international guide for research and practice, *Chap*. 15: 1–18.
28. Stoner, J.D. (1978). *Water-quality indices for specific water uses*. Department of the Interior Geological Survey.
29. Sutadian, A.D., Muttil, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environmental Monitoring and Assessment 188*(1): 1-29. https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0.
30. Sutadian, A.D., Muttil, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators* 75: 220-233. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043.
31. Tiwari, A.K., Singh, A.K., & Mahato, M.K. (2018). Assessment of groundwater quality of Pratapgarh district in India for suitability of drinking purpose using water quality index (WQI) and GIS technique. *Sustainable Water Resources Management 4*(3): 601-616. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0144-1.
32. Uddin, M.G., Nash, S., & Olbert, A.I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators* 122: 107218. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218.
33. Varol, S., & Davraz, A. (2015). Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences 73*(4): 1725-1744. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3531-z.
34. Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Ganthi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment 171*(1): 595-609. https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1.
35. Verma, P., Singh, P.K., Sinha, R.R., & Tiwari, A.K. (2020). Assessment of groundwater quality status by using water quality index (WQI) and geographic information system (GIS) approaches: a case study of the Bokaro district, India. *Applied Water Science 10*(1): 1-16. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1088-4.
36. Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, V., Sharma, S., & Arya, S. (2015). Water quality assessment of Pahuj River using water quality index at Unnao Balaji, MP, India. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research 19*(1): 241-250.